第65卷 第6期 天 文 学 报 Vol. 65 No. 6
2024年11月 ACTA ASTRONOMICA SINICA Nov., 2024

doi: 10.15940/j.cnki.0001-5245.2024.06.009

# HY2D星载北斗数据质量评估及事后精密定轨精度分析*

徐可馨[1,2] 周旭华[1†] 彭海龙[3,4] 王晓梅[3,4]
李 凯[1] 李朵朵[1,2]

(1 中国科学院上海天文台 上海 200030)
(2 中国科学院大学 北京 100049)
(3 国家卫星海洋应用中心 北京 100081)
(4 自然资源部空间海洋遥感与应用重点实验室 北京 100081)

**摘要** 基于海洋二号D卫星(HY2D) 2021年7月7–16日(年积日Day Of Year (DOY) 188–197)的星载北斗观测数据, 从测量数据有效性、可见卫星数量、位置精度因子及伪距多路径效应等角度分析了数据质量, 并利用其进行事后精密定轨, 从相位残差、重叠弧段、轨道互比和激光检核4种手段评估了定轨结果精度. 结论如下: (1) HY2D卫星接收北斗三号卫星数在4颗及以上占比约为86.66%; B1C频点多路径误差RMS (Root mean square)约为0.37 m, B2a频点约为0.18 m. (2)载波相位拟合残差RMS在6–8 mm之间; 相邻轨道重叠4 h的位置差异小于2 cm, 与法国CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) DORIS (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite)轨道比较径向RMS优于1.9 cm. (3)用激光测距数据检核轨道精度, 其星距残差的RMS约为3.24 cm. 结果表明, 国产星载双频北斗接收机可以完成海洋测高卫星的精密定轨指标.

**关键词** 航天器: HY2D卫星, 天体力学: 精密定轨, 方法: 激光检核
**中图分类号**: P135; **文献标识码**: A

## 1 引言

海洋二号D卫星(HY2D)是国家空间基础设施海洋动力卫星系列的第4颗业务卫星, 于2021年5月19日在酒泉卫星发射中心发射成功, 卫星轨道倾角为66°, 半长轴7328.583 km, 轨道平均高度为957.583 km. 当前, HY2D卫星与先前发射的海洋二号B星(HY2B)和海洋二号C星(HY2C)实现业务化组网观测, 共同构建了我国首个海洋动力环境卫星星座[1], 提高了我国海洋卫星综合观测能力, 为海洋灾害、海洋资源开发和利用、全球气候变化等研究等提供精准的全球全天候海面风场、浪高、海面高、海面温度等多种海洋动力环境参数[2]. 图1给出了海洋动力环境卫星星座和HY2D载荷示意图.

HY2D属于海洋测高类卫星, 搭载了用于收集海洋环境信息的微波散射计、微波成像仪和雷达高度计等多个载荷, 同时搭载了用于高精度定轨的星载GNSS (Global Navigation Satellite System)接收机、DORIS (Doppler Orbitography and Ra-

2023-10-10收到原稿, 2023-11-03收到修改稿
*国家自然科学基金项目(12103077)资助
†xhzhou@shao.ac.cn

dipositioning Integrated by Satellite)系统和SLR (Satellite Laser Ranging)卫星激光反射棱镜, 其载荷示意图见图1右, 其中TCC (Telemetry, Tracking, and Command)天线用于接收遥测信息. 特别说明的是HY2D卫星配备了两个国产星载GNSS接收机: 第1个GNSS接收机作为主要设备, 只接收GPS (Global Position System)信号; 第2个接收机是可以接收BDS-3 (BeiDou Navigation Satellite System-3) B1C/B2a新信号的备用设备. 测高卫星的精确轨道是调查全球、区域和沿海海平面及其变化的先决条件, 可靠地确定海面高度需要精确的卫星径向位置. 基于多种跟踪数据获得的定轨结果随着观测数据质量、力学模型和参考框架改进, 精度不断提高[3]. 如早期TOPEX (Topography Experiment)/Poseidon测高卫星径向定轨精度约为3 cm, 已满足测高需求, 而当前Jason系列卫星、Sentinel系列卫星的径向定轨精度好于2 cm[4–5]. 我国海洋二号系列卫星精密定轨也取得了一定进展, 周旭华等[6]用GPS、DORIS和SLR这3种数据对HY2A卫星进行联合定轨, 通过不同空间大地测量技术结合提高轨道的一致性和准确性, 径向定轨精度达1.2 cm; Wang等[7]对HY2C卫星建立姿态模型来缓解卫星偏航机动过程中存在的问题, 并通过3个月实测数据验证模型径向定轨精度优于2 cm.

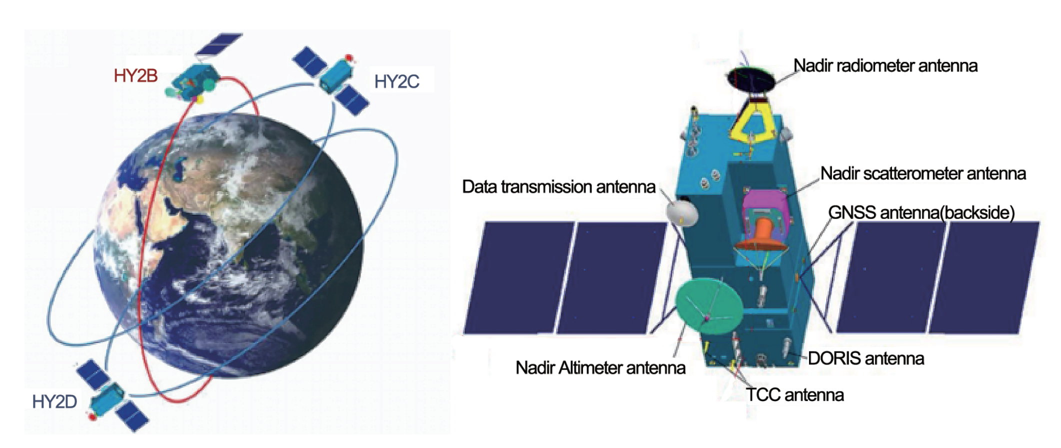



图 1 海洋动力环境卫星星座及HY2D载荷示意图(图源国家卫星海洋应用中心)

Fig. 1 The constellation of ocean dynamic environmental satellites and schematic diagram of HY2D payload (from National Satellite Ocean Application Service)

当前, 国内一些低轨卫星上搭载了GPS/BDS双模接收机, 国内外许多学者开展了星载BDS数据的精密定轨研究. 如Li等[8]利用星载BDS-2和GPS观测值实现了风云3C卫星精密定轨优于2 cm的轨道重叠精度, 与GPS相比, 轨道差异3D RMS (Root Mean Square)为0.75 cm. Zhao等[9]利用FY3C星载BDS-2数据确定了动力学轨道, GPS解算结果与BDS-2解算轨道差异3D RMS约为15.8 cm. Zhao等[10]研究了天平一号卫星BDS-2/3观测值的星载B1I/B3I测距精度, 认为BDS-3定轨精度优于BDS-2, GPS与BDS-3解算轨道3D RMS约为4.57 cm, 其定轨结果表明仅使用星载BDS-3观测值即可实现亚分米级轨道确定. Zhang等[11]对TH-2A/B在轨机动进行了研究, 分别利用GPS和BDS-2观测值进行定轨, 结果表明轨道机动引起的影响都能得到很好的消除, GPS解算结果相比, 基于BDS-2定轨结果3D RMS优于8.0 cm, 能满足InSAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar)任务需求. Zhang等[12]利用B1C/B2a实现TH02卫星精密定轨, 定轨结果表明B1C/B2a数据的定轨结果与B1I/B3I数据相当, 其与GPS为标准的轨道3D RMS小于7 cm. BDS-3+GPS组合运动学轨道

3D RMS可达3 cm, 相对于仅使用GPS的解决方案有超过25%的改进.

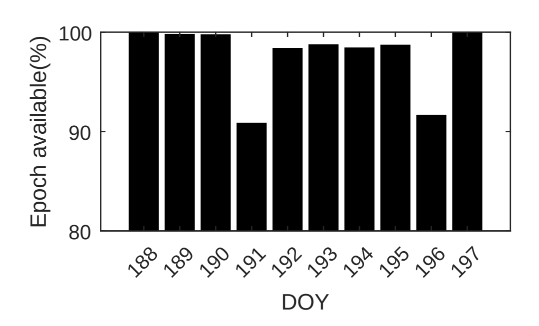
2020年7月底我国北斗三号导航卫星正式开通服务, 星座由24颗中圆轨道MEO (Medium Earth Orbit)卫星、3颗倾斜轨道IGSO (Inclined Geosynchronous Earth Orbit)卫星和3颗地球静止GEO (Geosynchronous Earth Orbit)卫星组成. 与北斗二号不同, 北斗三号能提供B1C和B2a频点信号. HY2D星载北斗接收机具备接收北斗三号B1C和B2a频点能力, 但利用新信号进行低轨卫星精密定轨的相关研究仍不充分, 本文将针对HY2D的星载北斗三号观测数据展开研究, 分析国产北斗星载接收机的数据质量情况, 基于HY2D卫星星载北斗观测数据进行事后精密定轨, 并对定轨精度进行分析.

## 2 HY2D数据和质量分析

为全面了解HY2D星载北斗三号卫星的观测数据质量, 基于HY2D 2021年DOY (Day Of Year) 188–197 d的星载BDS-3观测数据, 本节将从测量数据有效性、可见卫星数量、位置精度因子PDOP (Position Dilution Of Precision)、多路径效应等方面进行分析.

### 2.1 测量数据有效性

本文中有效历元数量指同时具有完整的双频伪距和载波相位观测值的历元数量, 有效历元数量与理论历元数量的比值可以用来评估星载观测数据的可用性. 导航卫星的历元可用性和单历元的有效卫星数, 表明了定轨所用有效数据的冗余度, 影响定轨结果的质量. 本文统计了试验期间星载北斗数据的历元可用性, 其中卫星截止高度角设为5°, 数据采样间隔为10 s. 图2给出了试验期间HY2D卫星星载北斗三号数据的可用性情况以及每个历元接收有效卫星数量的比例分布情况, HY2D卫星接收北斗三号卫星数量集中在4–6颗卫星, 其中观测卫星数量在4颗及以上的比例为86.66%, 若不考虑IGSO卫星, 可观测BDS-3 MEO卫星数量在4颗及以上的比例为78.47%, 相较于天平一号B星有3%的概率没有可用BDS-3卫星[13], 有效性相对较高; 但是, 历元可用性并不稳定, 少数天数如DOY 191、DOY 196数据丢失比例较高, 星载北斗数据可用性在90%左右, 其他天的星载北斗数据可用性基本高于95%, 试验期间平均数据可用性为97.28%.



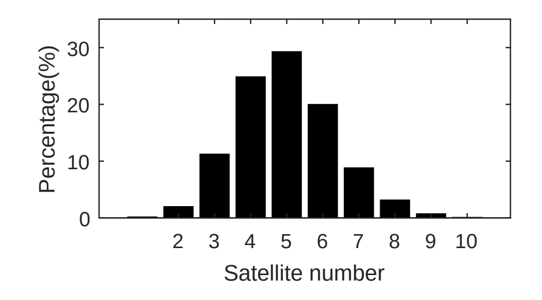




图 2 HY2D星载数据北斗三号数据可用性(左)和单历元有效卫星数出现的概率(右)

Fig. 2 Availability of HY2D onboard BDS-3 data (Left) and percentage of available satellites number per epoch (Right)

### 2.2 可见卫星数量和PDOP分布

卫星可见性即单历元能够观测到的具有双频伪距和载波相位观测值的卫星数量, 理论可见卫星数则是通过当前低轨卫星位置能接收到的导航星信号情况, 卫星可见性能够直观表现星载接收机对导航卫星的跟踪情况, 在一定程度上也反映了国产星载接收机接收北斗三号卫星新体制信号的性能. 图3给出了试验期间平均每天的星载北斗接收机理论接收卫星数与实际接收卫星数(卫星截止高度角设为5°), 并且统计了方位角与丢失卫星情况的关系. 需要特别指出的是, 这里定义卫星飞行方向为方位角0°. 可以注意到在卫星飞行方向上±120°存

在明显的信号丢失情况, 实际接收BDS-3信号数低于理论值. 结合载荷位置图, 星载接收机相对靠后, 受前部载荷干扰, 信号锁定受到一定影响. 图4给出了试验期间星载北斗接收机观测卫星数量的中位数分布情况, 从图中可以看到中国区域及周边可观测的卫星数量在6–8颗, 明显高于其他区域, 这主要归功于北斗三号IGSO星座的补充作用, 其他区域观测的卫星数量分布较为均匀.

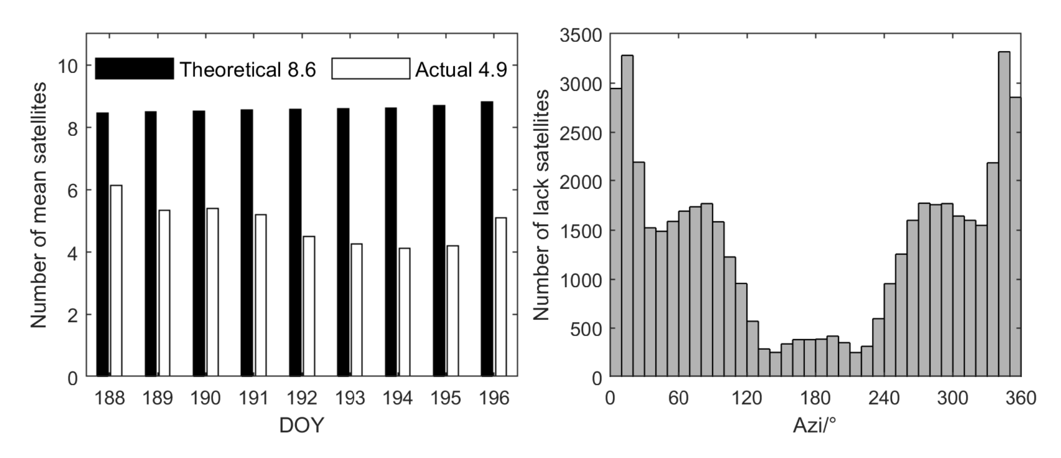



图 3 HY2D星载北斗接收机理论接收卫星数与实际接收卫星数(左)和缺失卫星个数与方位角(Azi)关系(右)

Fig. 3 Theoretical number vs. actual number of received satellites for HY2D onboard BDS-3 receiver (Left) and relationship between number of lack satellites and azimuth (Azi, Right)

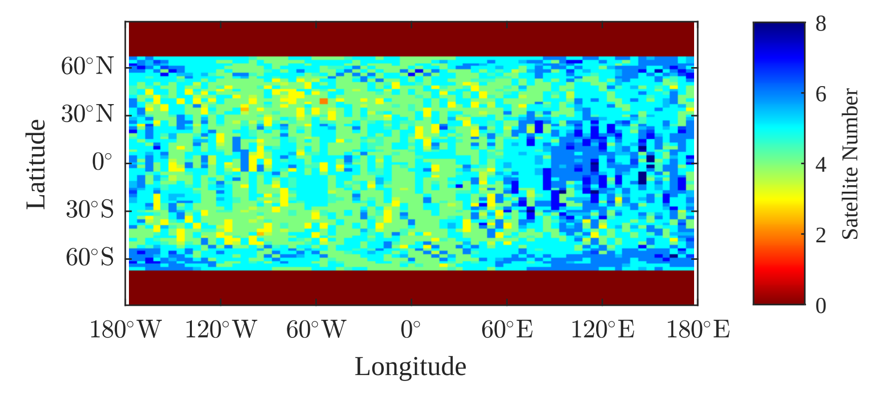



图 4 2021年年积日188至197 HY2D星载BDS-3接收机观测卫星中位数

Fig. 4 Median number of HY2D onboard BDS-3 receiver from DOY 188 to 197 in 2021

此外, 图5给出了试验期间星载接收机北斗数据的几何精度因子分布情况, 值得注意的是, 在亚太区域的低纬度地区存在明显的PDOP值异常的情况. 经过对原始数据的分析, 发现在HY2D卫星经过该区域时基本可同时观测到2颗IGSO卫星, 且当持续跟踪的一颗MEO卫星低于截止高度角时就会导致这种PDOP值的异常变化.

## 2.3 多路径噪声

伪距多路径误差是衡量星载观测数据质量的关键指标之一, 图6给出了星载北斗观测数据B1C频点和B2a频点的伪距多路径误差的分布情况. 图7显示了HY2D星载北斗数据的伪距多路径误差

大小与高度角的关系, 可以注意到, B1C信号的多路径误差高于B2a的多路径误差. HY2D星载北斗数据的伪距多路径误差大小与空间位置有较强的相关性, 随着高度角的升高, 其伪距多路径误差逐渐减小; 在卫星高度角30°左右且方位角180°–240°之间时有明显的多路径误差异常现象, 这可能与星载接收机天线的空间位置有关. 总体来说, HY2D星载北斗数据的B1C频点多路径误差的均方根误差约为0.37 m, B2a频点多路径误差的均方根误差约为0.18 m.

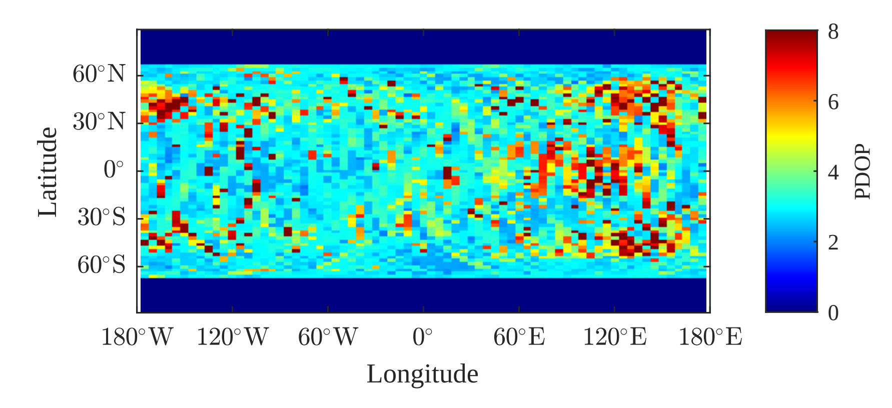



图 5　2021年年积日188至197 HY2D星载BDS-3接收机PDOP分布情况

Fig. 5　The PDOP distribution of HY2D onboard BDS-3 receiver from DOY 188 to 197 in 2021

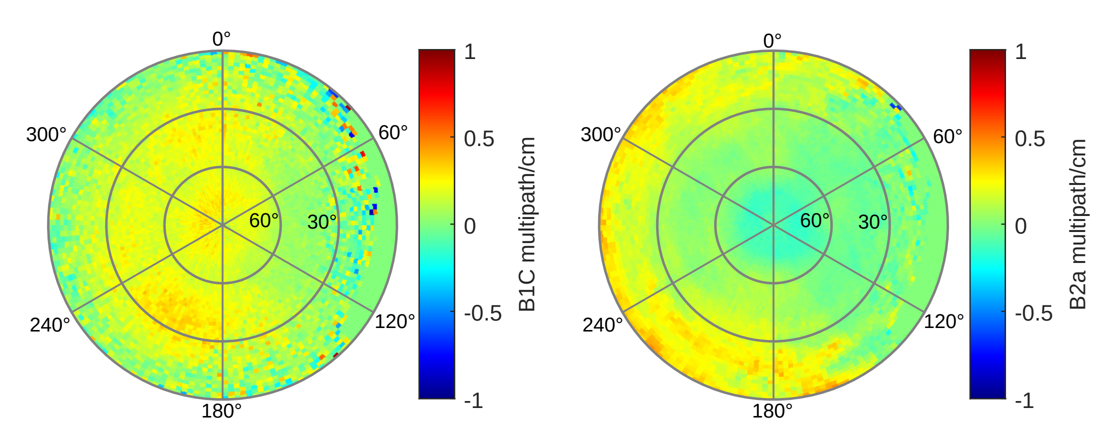



图 6　HY2D星载BDS-3伪距多路径误差随方位角-高度角分布图(左: B1C; 右: B2a)

Fig. 6　Azimuth-elevation maps of code multipath error for BDS-3 (left: B1C; right: B2a)

## 3　HY2D精密定轨及精度分析

### 3.1　定轨策略

本文使用上海天文台自主研发的软件, 采用简化动力学的方法对HY2D卫星北斗三号星载观测数据进行精密定轨试验. 需要注意的是当前IGS各家分析中心北斗三号精密钟差产品均基于B1I/B3I无电离层组合基准, 因此在使用时应先利用差分码偏差DCB (Differential Code Bias)或观测特定信号偏差OSB (Observable-specific Signal Bias)产品完成基准的转换, 本文使用CAS (Chinese Academy of Sciences)提供的DCB产品进行偏差修正. BDS-3星历使用GFZ (GeoForschungsZentrum)提供的MGEX (Multi-GNSS Experiment)产品. HY2D的天线相位中心PCO (Phase Center Offset)使用先验标定值也在表1中给出, 天线相位中心变化PCV (Phase Center Variations)在轨估计, 详细的定轨策略如表1所示, 具体力学模型见相应文献说明.

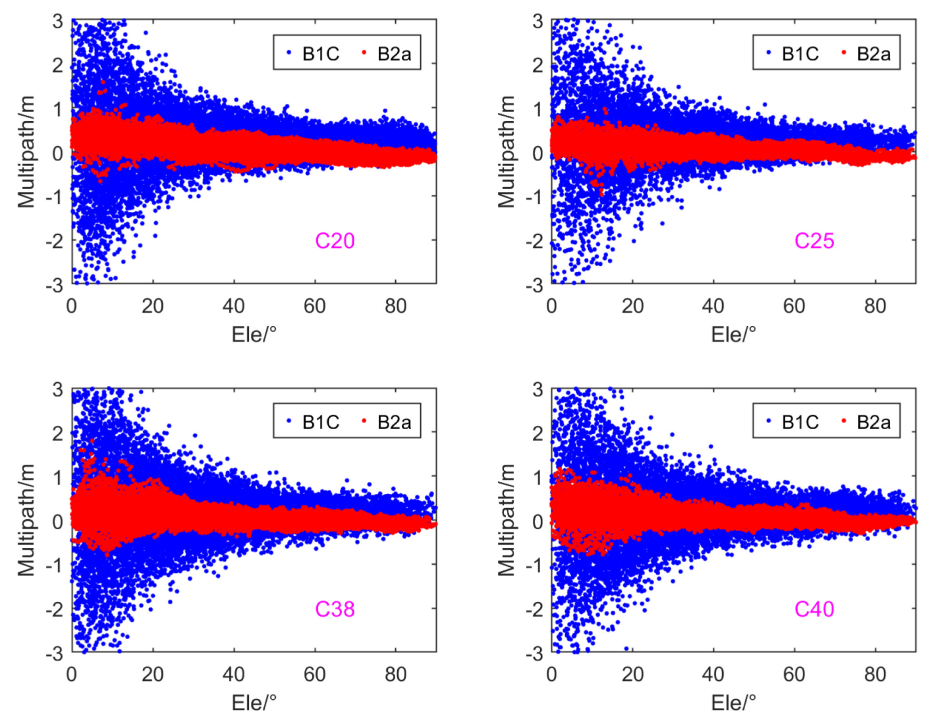



图 7 北斗三号MEO (C20/C25)和IGSO (C38/C40)卫星的伪距多路径误差与高度角(Ele)的变化情况

Fig. 7 Variation in code multipath error with elevation angle (Ele) for BDS-3 MEO (C20/C25), and IGSO (C38/C40)

### 3.2 定轨残差分析

定轨所采用的力学模型与实际情况的符合程度可体现在观测值残差大小上, 相位拟合残差包含了模型化误差和未被模型化的误差, 其RMS值可以作为内符合精度评定的指标之一. 图8给出了定轨弧段各个卫星的伪距残差和相位拟合残差, 其中PC代表伪距组合, LC代表相位组合, 横坐标为卫星PRN (Pseudo Random Noise Code)号. 在对观测数据进行OSB修正后, 伪距残差恢复正常水平. 相位残差的RMS值都很接近, 均在6–8 mm之间, 表明采用的简化动力学定轨策略基本可靠.

### 3.3 轨道重叠弧段

重叠弧段内的轨道是两次独立定轨的结果, 其差异可以初步反映定轨精度与稳定性. 采用30 h弧长定轨时, 每两个相邻的定轨弧段存在6 h的重叠, 为去除边缘效应定义重叠弧段为当日22:00:00至次日02:00:00. 图9给出了2021年7月7日22:00:00至7月8日02:00:00重叠弧段差异和试验期间所有定轨弧段重叠部分在径向(Radial, R)、切向(Along-Track, A)、法向(Cross-Track, C)以及三维(3D)轨道差异RMS统计.

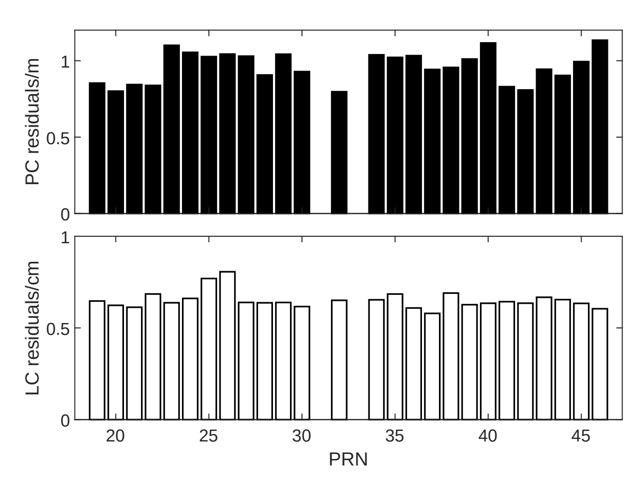



图 8 伪距残差(上)与相位拟合残差统计(下)

Fig. 8 RMS of PC residuals (upper) and LC residuals (bottom) of each BDS-3 Satellites

表 1 HY2D精密定轨模型和策略

**Table 1 POD model and strategy used for the HY2D**

| Type | Model/Parameters | Description |
|---|---|---|
| Reference frame | Conventional inertial reference frame | J2000 |
| | Precession and nutation | IAU2000 R06 |
| | Earth orientation | IERS C04[14] |
| Dynamic model | N-body perturbation | JPL DE421 |
| | Gravity model | EGM2008 (120 x 120)[15] |
| | Relativity | IERS 2010 Conventions |
| | Solid earth tide and pole tide | IERS 2010 Conventions |
| | Ocean tide | FES2004[16] |
| | Solar radiation | Box-Wing[17] |
| | Atmosphere drag | DTM94[18] |
| | Empirical force | One-cycle-per-revolution acceleration in along-track and cross-track |
| Observation model | Observation | ionosphere-free linear combination |
| | Arc length and interval | 30 h, 30 s |
| | Elevation cut-off angle | 5° |
| | BDS-3 ephemeris and clock | GFZ precise final products |
| | OSB products | CAS0 rapid |
| | HY2D antenna PCO/PCV | [−0.900 m, 0.182 m, −1.361 m], PCV estimated |
| Estimated parameters | Initial state | Position and velocity at the initial epoch |
| | Receiver clock offset | Epoch-wise clock offsets |
| | Phase ambiguities | Float |
| | Pseudo-stochastic pulses | One group per 6 min in the along- and cross-track direction |

从图9可以看出定轨弧段重叠差异在径向、切向及法向3个方向残差分布较为稳定, 定轨过程中采用的动力学模型和定轨策略合理, 其中DOY 191重叠弧段差异较大原因可能是数据存在缺失问题, 总体来说三维位置差异RMS在2 cm以内.

### 3.4 外部轨道比较

HY2D卫星除搭载星载GNSS接收机外, 还配备了DORIS仪器, 从而产生了两种完全独立的定轨解决方案. HY2D卫星DORIS观测数据主要以RINEX (Receiver Independent Exchange Format) 3.0格式发布, 与星载GNSS数据类似, 有伪距和相位两类观测值. 其中伪距精度为m级, 通常用于钟差解算, 相位观测值的精度为mm级, 是精密定轨主要数据源. 本文选取的HY2D北斗观测期间, 法国国家空间研究中心CNES (Centre National d'Etudes Spatiales)提供了利用DORIS观测数据定轨获得的精密轨道; 经SLR检核, 其精度在3 cm左右, 可以作

为参考轨道来衡量本文轨道产品的精度, 其差异大小可以检验与外部产品的一致性. 图10给出了简化动力学轨道和CNES提供的DORIS轨道的差异, 两种产品在轨道径向方向上RMS优于1.9 cm, 切向上优于5.4 cm, 法向上优于2.1 cm. 切向上的RMS值最大. 由于伪随机脉冲参数未能很好地吸收大气阻力和太阳光压等误差, 切向差异中出现较为明显的“突刺”现象. 整体上看, 基于BDS-3的简化动力学轨道的径向精度较高, 与DORIS结果表现出较好的一致性.

### 3.5 激光检核

SLR可独立检核卫星轨道精度, 其观测量为激光测距仪测定的目标卫星和测站之间的激光脉冲往返时间间隔. 通过模型修正, 可以将高精度测距数据与相应时刻站星距作差, 当观测接近天顶方向时, 其差值可以近似体现卫星在径向上误差. 本文利用SLR观测数据独立检核2021年DOY 188–197的HY2D卫星的简化动力学轨道精度. 其中, SLR台站的坐标基于SLRF (Satellite Laser Ranging Frame) 2014, 考虑到站点的稳定性, 仅采用核心站进行检核.

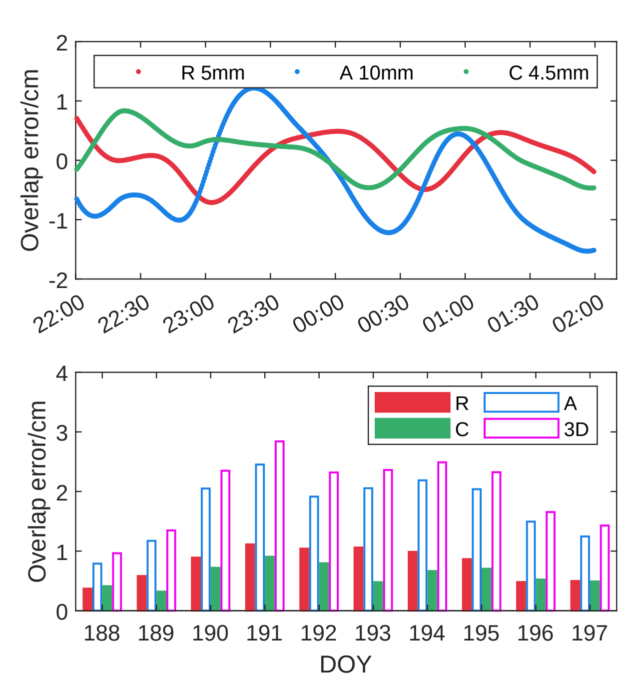



图 9 2021年7月7日22:00:00至7月8日02:00:00重叠弧段差异(上)和所有定轨弧段重叠部分在径向、切向、法向、三维方向上的轨道差异RMS统计(下)

Fig. 9 Overlapping arc segment differences from 22:00:00 on July 7, 2021, to 02:00:00 on July 8, 2021 (upper) and RMS statistics of overlapping differences of all orbit determination arc segments in radial, along-track, cross-track and 3D directions (bottom)

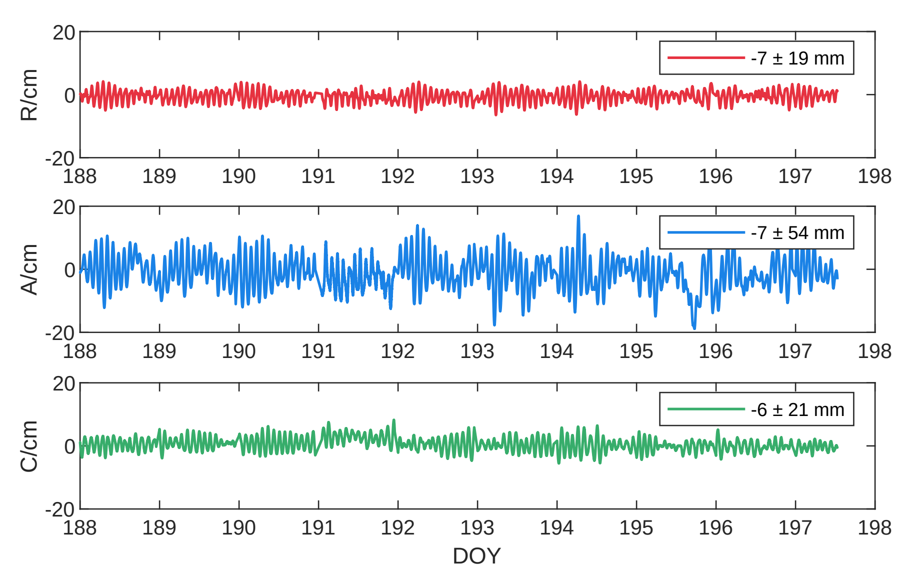



图 10 2021年年积日188至197简化动力学定轨结果与CNES的差异

Fig. 10 Difference of the reduced-dynamic orbit determination results compared to CNES from DOY 188 to 197 in 2021

在进行SLR检核时, 台站需要考虑到潮汐改正(包括海潮、固体潮和极潮)和板块运动的影响, 观测资料的改正主要包括大气折射改正、卫星质心距离补偿改正、测距偏差改正和广义相对论效应改正等. 对残差以30 cm为阈值异常值进行探测, 得到残差序列分布, 如图11所示. 经统计所有残差的平均值为−2 cm, 均方根误差为3.24 cm.

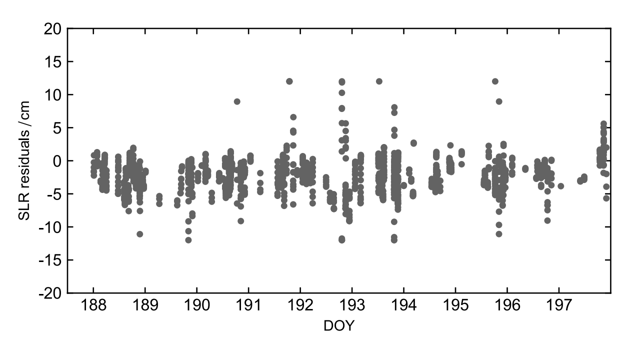



图 11　2021年年积日188至197 HY2D卫星激光检核轨道的残差分布图

Fig. 11　Residuals of the HY2D satellite laser ranging measurements from DOY 188 to 197 in 2021

## 4　结语

作为中国第4颗海洋动力环境任务卫星, HY2D卫星搭载了星载北斗接收机, 为研究星载北斗数据定轨性能提供了重要数据. 通过2021年7月7–16日间(DOY 188–197) HY2D星载BDS-3数据质量分析、相位观测值残差、轨道重叠弧段以及与外部轨道对比等一系列内外符合精度评定方法对本文定轨结果进行综合评估, 得到如下结论:

(1)对HY2D卫星BDS-3数据质量进行分析得出, HY2D卫星接收北斗三号卫星数量集中在4–6颗卫星, 星载北斗接收机在飞行方向±120°存在明显的信号丢失情况, 实际接收BDS3信号数低于理论值, 国产北斗星载接收机的信号锁定性能还有进一步提升的空间. 由于北斗三号IGSO星座的补充作用, 中国周边海面的卫星观测数量在6–8颗, 高于其他地区.

(2)轨道内符合方面: HY2D星载BDS-3相位观测值残差RMS为6–8 mm, 经过预处理的星载BDS-3观测数据与简化动力学模型符合较好; 对重叠轨道进行统计分析, HY2D卫星径向、切向以及法向轨道差值RMS均在1 cm左右, 重叠轨道之间符合较好.

(3)轨道外符合方面: 与CNES提供的参考轨道互差, 径向优于2 cm; 利用ILRS提供的SLR观测数据对简化动力学轨道进行检核, 事后轨道精度在3 cm左右. 定轨结果表明, 国产星载双频北斗接收机可以完成海洋测高卫星的精密定轨指标.

当前, 受BDS-3精密轨道和钟差产品限制, 星载BDS定轨结果可能稍大于星载GPS数据结果, 但随着BDS地面建站增加, 其星历产品精度将不断提高, 将提高低轨卫星基于BDS-3星载观测值定轨的精度. 同时, 进一步研究新频点信号星上数据质量对星载BDS接收机性能以及BDS-3数据在低轨卫星定轨中的应用具有重要的参考价值.

## 参考文献

[1] 贾永君, 刘建强, 林明森, 等. 卫星应用, 2021, 9: 27
[2] 刘建强, 蒋兴伟, 林明森. 卫星应用, 2021, 9: 14
[3] Visser P N A M, Van Den Ijssel J. SSRv, 2003, 108: 27
[4] Yunck T P, Bertiger W I, Wu S C, et al. GeoRL, 1994, 21: 541
[5] Fernandez M, Peter H, Arnold D, et al. AdSpR, 2022, 2: 70
[6] 周旭华, 王晓慧, 赵罡, 等. 武汉大学学报(信息科学版), 2015, 40: 1000
[7] Wang Y C, Li M, Jiang K C, et al. GPS Solution, 2022, 26: 1
[8] Li M, Li W, Shi C, et al. JGeod, 2017, 91: 1313
[9] Zhao Q L, Wang C, Guo J, et al. GPS Solutions, 2017, 21: 1179
[10] Zhao X L, Zhou S S, Ci Y, et al. GPS Solutions, 2020, 24: 102
[11] Zhang H Z, Gu D F, Ju B, et al. RemS, 2021, 13: 5002
[12] Zhang H Z, Ju B, Gu D F, et al. ChJA, 2023, 36: 475
[13] 赵兴隆. 低轨星座提升北斗空间信号精度关键技术及星载GNSS定轨研究. 上海: 中国科学院上海天文台, 2021: 23
[14] Bizouard C, Lambert S, Gattano C, et al. JGeod, 2019, 93: 621
[15] Pavlis N K, Holmes S A, Kenyon S C, et al. JGRB, 2012, 117: 4
[16] Lyard F, Lefevre F, Letellier T, et al. OcDyn, 2006, 56: 394
[17] Rodriguez-Solano C J, Hugentobler U, Steigenberger P. AdSpR, 2012, 49: 1113
[18] Berger C, Biancale R, Barlier F. JGeod, 1998, 72: 161

# HY2D Satellite Onboard BDS-3 Data Quality Evaluation and Post-precise Orbit Determination Accuracy Analysis

XU Ke-xin[1,2] ZHOU Xu-hua[1] PENG Hai-long[3,4] WANG Xiao-mei[3,4] LI Kai[1] LI Duo-duo[1,2]

*(1 Shanghai Astronomical Observatory, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200030)*
*(2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049)*
*(3 National Satellite Ocean Application Service, Beijing 100081)*
*(4 Key Laboratory of Space Ocean Remote Sensing and Application, Ministry of Natural Resources, Beijing 100081)*

**Abstract** Haiyang-2D (HY2D) satellite orbits with different arc lengths are determined based on BDS-3 (BeiDou-3) data collected from the onboard GNSS (Global Navigation Satellite System) receivers between July 7th and 16th, 2021 (day of year 188–197). The data quality of space-borne BDS-3 for HY2D satellites is analyzed from the aspects of satellite visibility, DOP (Dilution Of Precision) value, multipath effects. Meanwhile, the post-precise orbit accuracy is assessed using a number of tests, which include analysis of observation residuals, arc overlaps, orbit external-comparisons, and satellite laser ranging (SLR) residuals. The results indicate that: (1) Over 86.66% epochs with 4 BDS-3 satellites available. The multipath error RMS (Root Mean Square) for B1C frequency is about 0.37 m, and for B2a frequency, it is around 0.18 m. (2) Carrier phase fitting residuals range from 6 to 8 mm. The POD (Precise Orbit Determination) precision with only BDS-3 data is evaluated by overlap comparison, showing good orbit consistency at 2 cm level (3D RMS). As for external orbit validation, the radial RMS compared with the CNES (Centre National d'Etudes Spatiales) DORIS (Doppler Orbitography and Radio-positioning Integrated by Satellite) orbit is better than 1.9 cm. (3) The mean of SLR validation residual RMS is 3.24 cm. These results demonstrate that domestically-produced dual-frequency BDS receivers can meet the satellite's centimeter-level radial orbit determination requirements for altimetry satellites.

**Key words** spacecraft: HY2D satellite, celestial mechanics: precise orbit determination, methods: satellite laser ranging